

- определён оптимальный алгоритм управления подсистемой наддува баков, обеспечивающий наименьший необходимый запас газа наддува;
- определено влияние нештатной ситуации (отказа элемента ПГС) на функционирование системы.

Дальнейшим направлением использования разработанной модели ПГС являются:

- подготовка и проведение стендовых испытаний, по результатам которых будут подтверждены параметры модели;
- контроль параметров ПГС при летно-конструкторских испытаниях ЖРДУ и штатной эксплуатации.

УДК 621.454.2

МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2016 Л.С. Шаблий, В.М. Зубанов, Д.В. Степанов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

SIMULATION METHODS OF A BURNING PROCESS INSIDE A ROCKET ENGINE CHAMBER

Shabliy L.S., Zubanov V.M., Stepanov D.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

A work present methods for simulation of burning process in the rocket engine chamber. Has been mentioned four software tools for burning simulation. Here are considered widely used burning models. The detailed calculation of hydrogen-oxygen rocket engine chamber has been performed in ANSYS CFX with Eddy Dissipation model for two sets of chemistry: one global reaction and detailed chemical system with 8 components and 18 reactions. The comparison of results gives more smooth contours of parameters for set with detailed system against variant with one reaction.

Горение в камере ракетного двигателя (РД) – наиболее сложный из процессов, протекающих в нём. Горение происходит в условиях трёхмерного турбулентного течения. Для изучения данного процесса используются численные методы моделирования.

Моделирование процесса горения в камере РД может быть реализовано в следующих программных продуктах.

1. Программа “Terra”, разработанная в МГТУ им. Баумана. В данном программном комплексе реализован расчёт параметров равновесия продуктов сгорания, достигаемого в результате химической реакции по длине сопла РД в трёх точках: камера сгорания (КС), критика, срез сопла. Течение считается одномерным, т.е. невозможно получить распределение продуктов сгорания по срезу сопла.

2. Программа “SPPS PMX”, разработанная на кафедре теории двигателей летательных аппаратов в Самарском университете. В данном программном комплексе наряду с моделью идеального ракетного двигателя (РД) реализована двумерная газодинамиче-

ская модель с учётом вязкости в приближение пограничного слоя. Также учитывается двумерный характер течения в сверхзвуковой профилированной части сопла путём решения уравнений Эйлера.

3. Программа FlowVision, разработанная компанией ООО «ТЕСИС». Данный программный продукт даёт возможность пользователю решать задачи, связанные с горением, моделированием течения в газовых горелках, котлах, камерах сгорания.

В FlowVision реализованы следующие модели горения: «Зельдович», «Магнуссен», «Аррениус», «Аррениус-Магнуссен», упрощённая модель Eddy Dissipation Concept.

4. Программа ANSYS CFX разработчика ANSYS Inc. (SAS Inc.). В данном программном продукте можно реализовать не только трёхмерное течение рабочего тела, но и смоделировать внутрикамерные процессы, протекающие в ЖРД (подача компонентов топлива, смешение, гомогенное горение, диффузия, турбулентное перемешивание, образование продуктов сгорания).

Наиболее широко в ANSYS CFX используются модели горения Eddy Dissipation Model (EDM), Finite Rate Chemistry (FRC) и Laminar Flamelet.

В данной работе была опробована методика моделирования процесса горения в камере ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) на газообразном кислороде и водороде. В качестве инструмента моделирования был выбран ANSYS CFX.

При решении данной задачи была смоделирована химическая кинетика с использованием одной глобальной реакции (брутто-формула) и системы химических реакций, где участвуют 8 компонентов.

Для проведения расчёта с одной реакцией из библиотеки ANSYS CFX в пост-процессоре CFX-Pre была использована готовая реакция горения (*Hydrogen Oxugen*), в которой участвуют три компонента H_2 , O_2 , H_2O . В качестве рабочего тела была задана реагирующая смесь, которая получилась в результате выбранной реакции.

В параметрах расчётной зоны *Fluid Models* был указан состав смеси, ссылаясь на то, что в качестве конечного продукта реакции компонентом, которого получается большего всего по составу, является вода.

Выбрана модель горения – *Eddy Dissipation*. Данная модель была разработана для описания турбулентных течений предварительно перемешанных смесей. При её использовании предполагается, что химические реакции быстро приводят реагирующую смесь к равновесному состоянию, т.е. скорость химической реакции намного выше, чем скорость смешения горючего и окислителя.

Во входных граничных условиях каждой зоны были заданы массовые расходы, температура и массовые доли компонентов.

Значение критерия сходимости по квадратичным математическим невязкам *RMS* уставлено 10^{-6} .

Использование одной глобальной реакции не позволяет полностью описать раз-

ветвлённые цепные реакции, протекающие в смесях водорода с кислородом. Подробная кинетическая схема химических реакций с данными компонентами включает более 20 элементарных реакций с участием свободных радикалов в реагирующей смеси.

В данном исследовании механизм реакций для описания развёрнутой схемы химической кинетики был взят из источника [1]. Он состоит из 18 химических реакций. Скорость каждой реакции определяется уравнением Аррениуса.

Для описания каждой реакции в CFX-Pre были заданы вручную компоненты и продукты, участвующие в данной реакции, стехиометрические коэффициенты и порядок реакции. Заданы параметры уравнения скорости химической реакции (уравнение Аррениуса: предэкспоненциальный множитель A , показатель температуры n , энергия и температура активации E и T).

После задания всех реакций было создано вещество на основе реагирующей смеси. Дальнейшие шаги по решению данной модели не отличались от варианта с моделированием горения с использованием одной глобальной реакции.

При моделировании усложнённой системы реакций вследствие нестабильности увеличилось и время решения по сравнению с использованием одной глобальной реакции.

Полученные результаты показали, что расчёт с одной реакцией завышает местные значения температуры, а также поток получается более равномерным, осесимметричным. Но расчёт с усложнённой системой реакций даёт более плавное изменение температуры по длине камеры.

Проведённый обзор позволяет признать выбранное направление по исследованию моделей горения в ЖРД содержательным и интересным для дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Гардинер У. Химия горения / под ред. У. Гардинера. - М.: Мир, 1988. 464 с.